

УДК 621.391.2:519.24

ОЦЕНИВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОХРАНЫ

А. Л. Мархакшинов, А. А. Спектор

*Новосибирский государственный технический университет,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: spector@ktor.ref.nstu.ru*

Рассматривается оценивание характеристик движения объекта, контролируемого при помощи сейсмической системы охраны. Предполагается, что движение в локальной области пространства является равномерным и прямолинейным, поэтому задача сводится к получению оценок координат начальной точки и вектора скорости. Входными данными являются измерения разностей временных задержек поступления сейсмических сигналов на различные датчики системы. Обычно эти измерения образуются в реальных системах в виде последовательного потока. Получаемые оценки траектории также имеют характер последовательности, их точность увеличивается с ростом числа первичных данных. Приводятся результаты анализа точности предложенного метода, выполненного с помощью статистического моделирования.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, прямолинейное равномерное движение объекта, оценка параметров движения, исследование точности.

Введение. Значительные потенциальные достоинства сейсмических систем охраны (ССО) [1–6] способствуют их интенсивному развитию в последние годы. Действие таких систем основано на использовании размещаемых в грунте датчиков, в которых сейсмические колебания возбуждают электрические колебания. Получаемый сейсмосигнал после усиления и преобразования в цифровую форму подвергается анализу в компьютере или цифровом сигнальном процессоре. В число задач ССО входят: неклассифицированное обнаружение сейсмоактивного объекта, обнаружение объекта с отнесением его к определенному классу (человек, группа людей, автомобиль, самолет, крупное животное, мелкое животное и др.), определение траектории движения объекта. Обычно ССО состоит из значительного количества сейсмодатчиков, наиболее удобно размещаемых на охраняемом рубеже для решения всех задач наблюдения. Некоторые из них выполняются на основе автономного анализа сигналов отдельных датчиков. К числу задач, решаемых на базе совместного анализа группы сейсмосигналов, относится оценка характеристик движения объекта.

Целью данной работы является создание метода оценивания параметров перемещения объекта на ограниченном участке в предположении о прямолинейности и равномерности движения.

Оценивание характеристик прямолинейного равномерного движения. Практический интерес представляет определение траектории движения, т. е. совокупности координат положения объекта в последовательные моменты времени, и его скорости. Рассмотрим задачу определения вектора скорости движения и координат точки, через которую проходит движущийся объект, в предположении о прямолинейности и равномерности движения относительно локальной области — части общей (глобальной) зоны действия ССО, окружающей навигационную тройку датчиков (навигационный треугольник). В действительности движение может последовательно проходить через несколько аналогичных

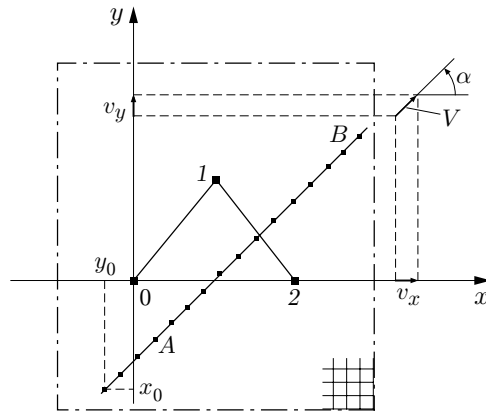


Рис. 1. Движение объекта в локальной окрестности навигационного треугольника

локальных структур, являясь глобально непрямолинейным и неравномерным, но, как правило, допуская в локальных областях принятие указанных предположений о характере движения. При наличии локальных оценок возникает отдельная задача их объединения, которая в данной работе не рассматривается.

Навигационный треугольник, образуемый сейсмическими датчиками 0, 1, 2, показан на рис. 1. Положение датчиков описывается декартовыми координатами: $X^{(0)} = \|x^{(0)}, y^{(0)}\|^T$, $X^{(1)} = \|x^{(1)}, y^{(1)}\|^T$, $X^{(2)} = \|x^{(2)}, y^{(2)}\|^T$, которые для удобства представлены в виде двумерных векторов. Здесь T — символ транспонирования. Прямая AB — траектория движения сейсмоактивного объекта с обозначением на ней точек, соответствующих выполнению локальных измерений. Если движущийся объект — человек, то точки соответствуют его шагам. Число точек определяется реальной чувствительностью датчиков. На рисунке точка с координатами (x_0, y_0) соответствует моменту обнаружения объекта датчиками навигационного треугольника, скорость движения которого характеризуется вектором $\mathbf{V} = \|v_x, v_y\|^T$, ориентированным вдоль линии AB .

Сейсмическая волна, возбуждаемая в отмеченных точках траектории, достигает датчиков с задержками, определяемыми расстояниями и скоростью распространения. Первичная обработка сигналов в датчиках состоит в оценивании моментов времени прихода сейсмических сигналов $t_i^{(0)}, t_i^{(1)}, t_i^{(2)}$ на 0-, 1- и 2-й датчики соответственно последовательно для всех наблюдаемых шагов $i = \overline{0, I}$. Процедуры получения этих оценок в данной работе не рассматриваются, один из вариантов первичного оценивания обсуждался в [6].

Пусть движущийся объект при его нахождении в i -й точке траектории имеет координаты $\mathbf{z}_i = \|x_i, y_i\|^T$. При разностно-дальномерном методе навигации для определения координат используются разности задержек $\Delta t_i^{(0,1)} = t_i^{(1)} - t_i^{(0)}$, $\Delta t_i^{(1,2)} = t_i^{(2)} - t_i^{(1)}$, $\Delta t_i^{(0,2)} = t_i^{(2)} - t_i^{(0)}$, называемые навигационными параметрами. Поскольку эти величины связаны с координатами очевидным соотношением

$$\Delta t_i^{(k,r)} = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_i - x^{(r)})^2 + (y_i - y^{(r)})^2} - \sqrt{(x_i - x^{(k)})^2 + (y_i - y^{(k)})^2} \right), \quad k, r = 0, 1, 2, \quad (1)$$

то, располагая какой-нибудь парой измеренных разностей для разных комбинаций номеров датчиков k и r , при известной скорости распространения сейсмических колебаний в грунте с можно из полученной системы уравнений найти пару координат объекта $\mathbf{z}_i = \|x_i, y_i\|^T$. Данная процедура может выполняться в текущем времени. К сожалению, получаемые таким образом оценки координат имеют весьма низкую точность. Это вызвано ошибками

измерения временных задержек $t_i^{(k)}$ и, как следствие, ошибками, содержащимися в разностях $\Delta t_i^{(k,r)}$.

Рассмотрим задачу оценки параметров прямолинейного равномерного движения объекта на i -м шаге наблюдения. Будем находить оценки начальных координат $\mathbf{z}_0 = \|x_0, y_0\|^T$ траектории и вектора скорости $\mathbf{V} = \|v_x, v_y\|^T$, совокупность которых полностью определяет движение в рамках принятой модели. Входными данными являются результаты оценивания текущих координат, которые образуются на каждом шаге решения уравнений вида (1). При оценивании траектории целесообразно применить принцип последовательного уточнения оценок на основе поступления новых входных данных после каждого шага первичного оценивания. Этот принцип дает возможность минимизировать задержку в получении искомых оценок, что является важной особенностью обработки сигналов в ССО.

Итак, на i -м шаге измеритель траектории располагает набором входных данных

$$\mathbf{z}_j^* = \|x_j^*, y_j^*\|^T, \quad j = 0, 1, \dots, i, \quad (2)$$

полученных в ходе первичных измерений на всех $j = \overline{0, i}$ шагах наблюдения. Для получения искомых оценок воспользуемся методом максимального правдоподобия. Функцией правдоподобия является $2(i+1)$ -мерная плотность вероятности векторов (2) для $j = 0, 1, \dots, i$. Ошибки первичных измерений задержек $t_i^{(0)}, t_i^{(1)}, t_i^{(2)}$ обычно являются случайными величинами с гауссовским распределением. С учетом возможной линеаризации (1) можно принять для измеренных координат (2) также гауссовское распределение. Точки первичных измерений (см. рис. 1), как правило, разнесены на время, существенно превышающее интервал корреляции сигналов и помех, поступающих от датчиков. Это дает возможность представить многомерное распределение первичных измерений координат (2) в виде произведения:

$$p(Z^{*(i)} | z_0, \mathbf{V}) = \prod_{i=0}^i p(z_j^* | z_0, \mathbf{V}), \quad Z^{*(i)} = \|z_0^*, z_1^*, \dots, z_i^*\|^T, \quad (3)$$

где

$$p(z_j^* | z_0, \mathbf{V}) = \frac{1}{2\pi|\mathbf{K}|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (z_j^* - z_0 - j\delta t \mathbf{V})^T \mathbf{K}^{-1} (z_j^* - z_0 - j\delta t \mathbf{V}) \right\} \quad (4)$$

— распределение локальных измеренных значений координат объекта на j -м шаге; \mathbf{K} — корреляционная матрица вектора \mathbf{z}_j^* ; δt — промежуток времени между первичными измерениями (период шагов человека, постоянный в рамках принятой локальной модели движения). Оценки максимального правдоподобия максимизируют функцию (3) и могут быть найдены из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln p(Z^{*(i)} | z_0, \mathbf{V})}{\partial z_0} = 0, \\ \frac{\partial \ln p(Z^{*(i)} | z_0, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя (3) и (4) в (5), после несложных преобразований можно получить следующие выражения искомых оценок:

$$\hat{V}_i = \frac{1}{\delta t} \left[\frac{12f_2(Z^{*(i)})}{i(i+1)(i+2)} - \frac{6f_1(Z^{*(i)})}{(i+1)(i+2)} \right], \quad (6)$$

$$\hat{z}_{0_i} = \frac{2(2i+1)f_1(Z^{*(i)})}{(i+1)(i+2)} - \frac{6f_2(Z^{*(i)})}{(i+1)(i+2)}. \quad (7)$$

Индекс i , которым снабжены оценки, подчеркивает последовательный характер их получения, при котором происходит уточнение после каждого шага оценивания. Входящие в (6) и (7) функции $f_1(Z^{*(i)})$ и $f_2(Z^{*(i)})$ являются достаточными статистиками и определяются выражениями:

$$f_1(Z^{*(i)}) = \sum_{j=0}^i z_j^* = f_1(Z^{*(i-1)}) + z_i^*, \quad (8)$$

$$f_2(Z^{*(i)}) = \sum_{j=1}^i jz_j^* = f_2(Z^{*(i-1)}) + iz_i^*. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует возможность их рекуррентного вычисления, благодаря чему отсутствует необходимость хранения вектора $Z^{*(i)}$ в процессе наблюдения за объектом, так как в вычислениях принимает участие лишь текущий элемент \mathbf{z}_i^* данного вектора. Применяя выражения (6)–(8) для $i = 1$, находим явное выражение начальных оценок $\hat{V}_1 = \frac{1}{\delta t} (z_1^* - z_0^*)$, $\hat{z}_{0_1} = z_0^*$.

Анализ ошибок оценивания. Исследование точности описанного алгоритма выполнялось методом статистического моделирования. В математической модели задается линия движения объекта AB , координаты начальной точки $\mathbf{z}_0 = \|x_0, y_0\|^T$, длина шага (расстояние между точками на линии AB) и вектор скорости $\mathbf{V} = \|v_x, v_y\|^T$. Для каждого шага вычисляются точные значения задержек, а работа первичных измерителей навигационных параметров имитируется добавлением к ним независимых гауссовских шумов. Среднее квадратичное значение шума σ увеличивается с ростом расстояния R от объекта до датчика по закону $\sigma = \gamma R/c$, где коэффициент пропорциональности γ определяется точностью работы первичных измерителей временных задержек [6].

Для найденного множества измеренных разностей $\Delta t_i^{(k,r)}$, $k, r = 0, 1, 2$, при помощи соотношения (1) определяются координаты $\mathbf{z}_i^* = \|x_i^*, y_i^*\|^T$. С этой целью в локальной области навигационного треугольника наносится прямоугольная сетка с шагами Δx , Δy , в узлах которой заранее рассчитываются и хранятся в виде таблиц соответствующие им значения этих разностей. Полученные в математической модели значения измеренных разностей сопоставляются с табличными и выбирается узел, для которого минимизируется невязка

$$\sum_{k,r} (\Delta t_i^{(k,r)} - \Delta t_c^{(k,r)})^2 = \min_{c \in \Omega_c},$$

где $\Delta t_c^{(k,r)}$ — расчетное значение разности задержек для узла сетки c относительно датчиков k и r , а Ω_c — множество узлов сетки. Полученные в результате этой процедуры координаты являются входными данными для нахождения искомых оценок параметров движения.

Качество получаемых оценок характеризуется среднеквадратическими ошибками $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_v, \sigma_\alpha$ оценивания параметров x_0, y_0, V, α соответственно, где $V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$,

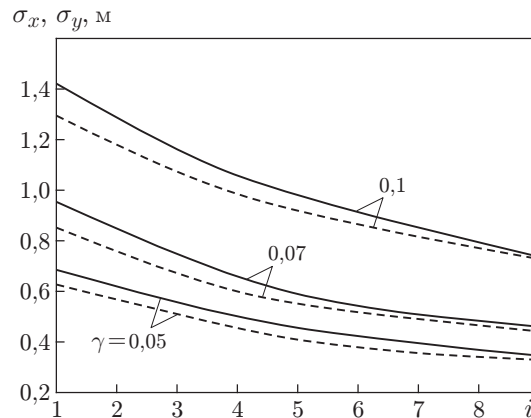


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки оценивания начальной точки траектории (σ_y — сплошные кривые, σ_x — штриховые)

$\alpha = \arctg(v_y/v_x)$ — модуль вектора скорости и угол (см. рис. 1), характеризующий направление движения объекта.

Полученные при статистическом эксперименте характеристики точности для различных уровней ошибок первичного оценивания, задаваемых коэффициентом γ , представлены на рис. 2–4. Показаны зависимости среднеквадратических ошибок оценивания от длительности наблюдения — количества i шагов человека, данные о которых (в виде первичных оценок времени поступления импульсов) используются для получения оценок траектории. Представленные на рисунках результаты относятся к траектории движения, для которой истинные параметры имеют следующие значения: $x_0 = 2$ м, $y_0 = 1,5$ м, $v = 1,5$ м/с, $\alpha = 45^\circ$. Длина шага равна 0,8 м, расстояние между датчиками 0 и 2 — 15 м, датчик 1 удален от оси x на 10 м, шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 0,5$ м, число узлов 60×60 .

Полученные зависимости иллюстрируют общую тенденцию уменьшения ошибок с ростом объема первичных данных, поступающих на построитель траектории. Как видно из рис. 2, процедура оценивания не обладает точностной симметрией относительно декартовых координат — в рассмотренном примере ошибки оценивания σ_y координаты y_0 несколько превышают ошибки σ_x . Это обусловлено известным в навигации влиянием так называемого геометрического фактора [7], которое приводит к зависимости первичных ошибок от текущих координат объекта.

Как следует из рис. 2–4, с 7-го по 9-й шаг (при названных параметрах движения это соответствует задержке всего на 3–4 с) ошибки оценивания σ_x , σ_y уменьшаются в 1,5–

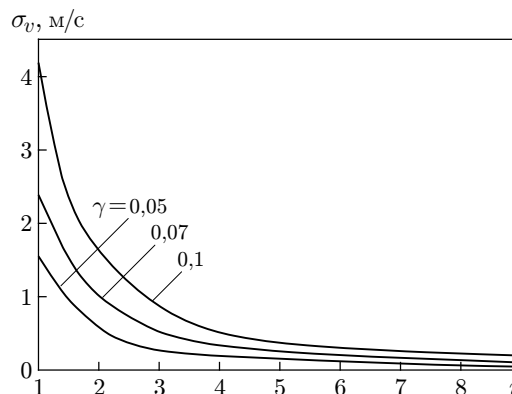


Рис. 3. Среднеквадратические ошибки оценивания скорости движения объекта

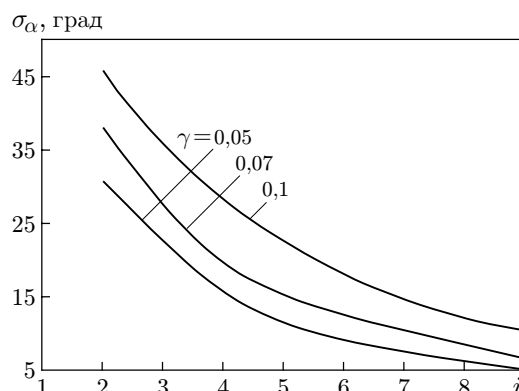


Рис. 4. Среднеквадратические ошибки оценивания направления движения объекта

2 раза, σ_α — в 5–6 раз, σ_v — в 10–15 раз по сравнению с начальными значениями, что является свидетельством достаточно высокой эффективности развитого метода и приемлемости предложенной процедуры в современных сейсмических системах охраны.

Заключение. Движение большинства сейсмоактивных объектов может быть представлено на локальных участках как прямолинейное и равномерное. Предложенный в данной работе метод, основанный на этом представлении, дает возможность получения оценок параметров движения, которые обладают высокой точностью, а последовательная технология получения этих оценок хорошо встраивается в общую обработку сигналов ССО, предотвращая нежелательные задержки в выдаче информации при работе в масштабе реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В. А. Варианты построения пассивных сейсмических локаторов, основанных на измерении временных задержек // Современные технологии безопасности. 2005. № 4. С. 15–17.
2. Магауенов Р. Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. М.: Горячая линия–Телеком, 2008. 496 с.
3. Иванов В. А., Онуфриев Н. В. Развитие принципов адаптации сейсмических средств охраны участков местности // Радиотехника. 2005. № 3. С. 97–99.
4. Крюков И. Н. Математическая модель подсистемы обнаружения сейсмических средств обнаружения территориально-распределенных радиотехнических систем охраны // Радиотехника. 2005. № 3. С. 84–87.
5. Райфельд М. А., Спектор А. А. Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов // Автометрия. 2005. 41, № 6. С. 88–97.
6. Спектор А. А., Филатова С. Г. Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. 44, № 4. С. 68–74.
7. Беляевский А. С., Новиков В. С., Олянюк П. В. Обработка и отображение радионавигационной информации. М.: Радио и связь, 1990. 232 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2009 г.